

DOI: 10. 13475/j. fzx. 20180101409

色纺纱的计算机配色研究进展

刘建勇, 黄 焯, 谭学强

(天津工业大学 纺织学院, 天津 300387)

摘 要 针对色纺纱配色原理复杂,难以对其进行颜色预测和配色的问题,归纳分析了几种可用于色纺纱计算机配色的预测模型在应用方面的特点。结果发现:Stearns-Noechel 模型、Kubelka-Munk 理论、BP 神经模型的计算精度较理想,Friele 模型精度较低;Stearns-Noechel 模型和 Friele 模型需求未知参数且参数对预测精度影响较大,Kubelka-Munk 理论与理想条件仍有差距且计算烦琐,BP 神经网络需要大量训练样本加强泛化能力。最后指出:色纺纱的配色应在继续提高传统配色模型精度的同时,改进求解配色模型中的未知参数,寻求新型配色模型;同时应注重企业个性化的参数设定,以及通过原液着色纤维的标准化,简化配色中的复杂计算,提高色纺纱的计算机配色技术水平。

关键词 色纺纱; 配色技术; Stearns-Noechel 模型; Friele 模型; Kubelka-Munk 理论; 神经网络模型

中图分类号: TS 104. 5 文献标志码: A

Research progress of computer color matching for colored spun yarn

LIU Jianyong , HUANG Ye , TAN Xueqiang

(School of Textiles , Tianjin Polytechnic University , Tianjin 300387 , China)

Abstract Aiming at the complicated color matching principle of colored spun yarn and difficult prediction on matched colors , the application characteristics of several prediction models for color matching of colored spun yarn were summarized and analyzed. The calculation precision of Stearns-Noechel model , Kubelka-Munk theory and BP neural model are ideal , and the precision of Friele model is lower. The Stearns-Noechel model and the Friele model , however , need to solve unknown parameters which have a great influence on the prediction accuracy. The Kubelka-Munk theory still has a gap with the ideal conditions and the calculation is cumbersome. The BP neural network requires a large number of training samples to enhance the generalization ability. Finally , it is pointed out that the color matching of color spinning yarns should improve the accuracy of the conventional model , and also improve the method for solving the unknown parameters in the color matching model and seek a new color matching model. Meanwhile , the personalization of the company's parameter settings should be paid more attention and the coloring fibers of the undiluted liquid should be standardized. The complicated calculation in color matching is simplified , and the computer color matching technology of the color spinning yarn is improved.

Keywords colored spun yarn; color matching technique; Stearns-Noechel model; Friele model; Kubelka-Munk theory; neural network model

色纺纱是将 2 种或 2 种以上不同颜色的有色纤维通过一定比例的混合、纺纱而成的混色纱线。如今色纺纱产品被越来越多地应用,与传统纺织品相比其具有一定的优势:因为各纤维组分采用原液着

色或者分别染色,所以可避免常规产品在染色过程的竞染、沾色等一系列问题;在色纺纱产品后整理时,可减少不同纤维因收缩或上染性能差异而形成疵点^[1];据不完全统计,色纺纱生产与其他工艺相

收稿日期: 2018-01-04 修回日期: 2018-08-03

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0302801-03)

第一作者简介: 刘建勇(1964—),男,教授,硕士。主要研究方向为生态纺织品和数字化染整加工技术研究。E-mail: jianyong1964@126.com。

比可减少 1/3 污水的排放,符合当今绿色节能的主题^[2];色纺纱织物可产生素色和夹花 2 种效果而使织物具有不同的风格;在工艺上可使用不同种类的纤维进行混纺而具有更加多样的性能^[3]。对于色纺纱而言,颜色表达不准确是非常棘手的问题,所以迫切需要解决如何快速准确地获取配色方案以实现预定颜色。

色纺纱的配色是物理过程,既不完全是光线的加法混合(ACML),也不完全是色料的减法混合(SCML)^[4],由于色纺纱的这种复杂性,导致目前仍缺乏合适配色模型的配色系统,且色纺纱配色不同于纺织品或纤维染色获得的均一颜色效果,混色效果具有层次感,色纺纱的颜色需要通过染色打样、混色打样、试纺及织样实验才可以确定^[5]。目前多数企业还是以人工打样为主,由于准确率不高,生产效率低,因此不能达到快速生产的市场需求。要开发色纺纱的配色技术,首先需要寻求一个合适的计算机配色模型,较早应用于纺织品的配色模型有 Friele 模型、Stearns-Noechel 模型和 Kubelka-Munk 理论等,鉴于这些模型都有不同的缺点,如今也有很多研究将一些新型模型应用于色纺纱的配色,期待得到较好的配色效果。

本文根据不同的计算机配色理论模型综述了色纺纱计算机配色的研究进展,总结各配色模型的优点与不足,并对计算机配色未来的研究方向进行了预测。

1 计算机配色理论模型

1941 年, Duntley^[6]将单色纤维以不同质量比、不同颜色混合,在特定波长下做出假设:

$$R_{s,\lambda} = \sum_{i=1}^n a_i R_{i,\lambda} \quad (1)$$

式中: $R_{s,\lambda}$ 为波长等于 λ 时混色纤维的总反射率,%; 下标 s 为混色纤维; a_i 为第 i 组分单色纤维占混合纤维的质量分数,%; $R_{i,\lambda}$ 为波长为 λ 时第 i 组分单色纤维的反射率,%; n 为组成混色纤维的单色纤维数。

但色纺纱的混色不是简单的加法混色,也不是减法混色,而是不同颜色纤维间对光线散射和吸收的相互影响,以及单色反射率与其组成比例之间是非线性关系,因此,式(1)对反射率直接加和的方法是不成立的,需要建立一个关于反射率的中间函数^[7]:

$$f(R_{s,\lambda}) = \sum_{i=1}^n a_i f(R_{i,\lambda}) \quad (2)$$

1.1 Stearns-Noechel 模型

1944 年, Stearns 和 Noechel 提出基于 Duntley 理

论的 Stearns-Noechel 模型^[8],并验证了该模型对羊毛混色试样的颜色具有良好的预测效果。其公式为

$$f[R(\lambda)] = \frac{1 - R(\lambda)}{M[R(\lambda) - 0.01] + 0.01} \quad (3)$$

式中: $R(\lambda)$ 为波长为 λ 时纤维的反射率,包含混色纤维的反射率 $R_{s,\lambda}$ 和单色纤维的反射率 $R_{i,\lambda}$; M 为常数,不同纤维的 M 值可由实验确定,羊毛纤维 M 值为 0.15。

求解 Stearns-Noechel 模型中 M 值的流程为:由几种单色纤维得到不同质量比的混色样品,将测得的单色纤维的反射率 $R_{i,\lambda}$ 代入式(3)求得 $f(R_{i,\lambda})$ 值;在已知混色比例的情况下应用式(2)得到混色纤维的 $f(R_{s,\lambda})$ 值,再将其代入式(3)即可反推得到混色样的 $R(\lambda)$ 值;通过以上计算得到的 $R(\lambda)$ 值与实际测得的值相差最小的情况下的 M 值即是最优 M 值。

Philips 等^[9]对棉纤维的双组分混色问题进行研究,利用数理统计法得到了 M 值与波长 λ 的函数关系: $M = (0.12\lambda + 42.75) / 1000$ 。Aspland 等^[10]基于 Stearns-Noechel 公式对黑白 2 色混纺纤维的颜色学特征进行实验,确定了该公式的 M 值,进一步探讨了织物的纹理对纺织品表现性能的影响。

我国学者对 Stearns-Noechel 模型也做了较多的研究:李戎等^[11]为验证 Stearns-Noechel 模型对有色纤维配色的有效性,利用该模型对 36 个混色粘胶纤维处方进行了匹配,研究表明 Stearns-Noechel 模型可应用于有色纤维的配色。为提高对天然彩棉混色织物的设计效率,王泉等^[12]基于 Stearns-Noechel 模型对天然彩棉混合散纤维团、混纺纱及交织物进行配色预测,得到最优 M 值,分别为: 0.096、0.128、0.010,应用优化后的 M 值可提高天然彩棉配色精度;陈维国等^[13]建立了可适用于毛条混色的预测模型,对 Stearns-Noechel 公式进行了优化和改善,建立了优化值 $M = (0.141\lambda + 94.266) / 1000$ 及优化表达式:

$$f[R(\lambda)] = \frac{1000 \times [1 - R(\lambda)]}{(0.141\lambda + 94.266) \times [R(\lambda) - 0.01] + 0.01}$$

利用修正后的模型,陈维国等^[7]自行开发了一套羊毛混色纺纱计算机智能测色配料系统,大大提高了打样配色速率。但该系统目前只能进行羊毛色织物的配色,下一步研究是对此模型做进一步修正,使其可运用到其他材质的混色纺织品的配色中。

沈加加等^[14]从算法角度出发,分别对 3 种配色模型(Stearns-Noechel 模型、Friele 模型、Kubelka-Munk 模型)做约束最小二乘法。此方法可识别色

纺纱的单色组分,进一步提高了色纺纱的计算机配色的实用性,结果表明基于 Stearns-Noechel 模型的最小二乘法进行色纺纱配色的准确性最高。Li 等^[15]在之前研究的基础上,采用最佳拟合算法优化了 Stearns-Noechel 模型,实验表明此模型的预测误差在可接受范围内,且显示出比 Kubelka-Munk 模型和 $\log(K/S)$ 模型更良好的预测精度。

为改进需做大量实验确立模型参数的传统方法,王玉娟等^[16]对未知参数在区间 $[0, 1]$ 进行赋值迭代取最优值,使每个试样配色时都能得到最佳参数。在此基础上对计算机配色系统进行改进,形成半智能配色系统,利用该方法可省去大量打样工作,色差更小,适用于企业生产,还可运用于其他模型的参数确立。但该研究只对棉、粘胶混纺纱做了实验,还不能证明其具有广泛适用性,后续还需对其他种类的纤维进行验证。

表 1 示出文献研究得到的有关不同纤维 Stearns-Noechel 模型的最优 M 值。

表 1 不同纤维的 Stearns-Noechel 模型中的参数 M 值

Tab. 1 Parameter M values in Stearns-Noechel models of different fibers

样品名称	M 值	文献
羊毛纤维	0.150	文献[8]
毛条	$(0.141\lambda + 94.266) / 1\ 000$	文献[14]
锦纶 6 纤维	0.090	文献[17]
腈纶混色织物	0.250	文献[18]
棉纤维	$(0.12\lambda + 42.75) / 1\ 000$	文献[9]
棉混色织物	0.153	文献[19]
色棉纤维	0.096	文献[12]
色棉混纺纱	0.128	文献[12]
色棉混色织物	0.010	文献[12]
粘胶纤维	0.090	文献[20]
涤纶混色织物	0.189	文献[21]

虽然 Stearns-Noechel 模型的预测精度较高,但不同品种的纤维混合、纤维的状态、成品的形态都会影响该模型中未知参数的确定。目前已有学者针对这个问题进行研究,但新方法的通用性还需进一步验证,这个问题的解决将有助于 Stearns-Noechel 模型的推广使用。目前只能通过大量的实验计算得到不同纤维的未知参数,从而找到适用于企业的经验值,进而减小配色误差。

1.2 Friele 模型

Friele^[22]根据有色介质对光线吸收和散射的特点进行了分析,同样在 Duntley 理论前提下获得了 Friele 理论,其函数表达式为

$$f[R(\lambda)] = e^{-\sigma[1-R(\lambda)]^{2/2R(\lambda)}} \quad (4)$$

式中 σ 为可变常数。

求解 Friele 模型中 σ 值的方法与求解 Stearns-Noechel 模型中 M 值的方法类似,在此不再赘述。

Barbara 等^[23]修正了 Friele 模型,对洗涤后的羊毛混色纤维进行配色实验,结果表明该修正公式可提高与实验测量值的拟合效果。Philips 等^[24]以棉纤维为实验样品进行双组分配色实验,运用该模型对混色纤维进行了颜色预测,但并没有公开算法。沈加加等^[5]基于 Friele 模型对羊毛色纺纱进行研究,优化了模型中的参数,得到羊毛和棉的最优 σ 值为 0.093 和 0.128;同时用其开发的配色软件进行实践,提出在色纺纱配色中同谱异色、夹花效果目测与仪器评价不符等问题需要解决。

表 2 示出有关文献研究得到的不同纤维 Friele 模型的最优 σ 值。

表 2 不同纤维的 Friele 模型中的参数 σ 值

Tab. 2 Parameter σ values in Friele models of different fibers

样品名称	σ 值	文献
毛条	0.30	文献[22]
羊毛色纺纱	0.093	文献[5]
粘胶色纺纱	0.28	文献[25]
锦纶 6 粗纱	0.25	文献[17]
腈纶色纺纱	0.11	文献[18]
涤纶色纺纱	0.094	文献[21]
涤纶混色织物	0.082 1	文献[19]
棉混色织物	0.107 2	文献[19]
涤/棉混色织物	0.156 3	文献[19]

马崇启等^[26]同样将对 Stearns-Noechel 模型参数确立的方法应用于 Friele 模型中。结果表明,该方法的平均拟合色差小于传统方法,但该研究仅针对粘胶纤维,还需进一步验证。

Friele 模型是一个专门针对色纺纱配色提出的预测模型,但其预测精度一般都比其他模型低很多,也存在与上述 Stearns-Noechel 模型一样需要计算参数的问题,所以在色纺纱配色的预测中研究较少。

1.3 Kubelka-Munk 理论

1931 年, Kubelka 和 Munk 提出了 Kubelka-Munk 理论,该理论是基于以下几个假设:介质必须是不透明的或半透明的;光线在试样中需被足够地散射从而呈现完全扩散的状态;试样界面上的折射率须无变化;光线在试样内的运动方向或所谓的通道只有 2 个,1 个向上,1 个向下,并且垂直于界面^[2, 27]。

简化处理后的 Kubelka-Munk 公式变为

$$K/S = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad (5)$$

式中: R 为试样在不同波长下的反射率,%; K/S 为

有色纤维的吸收系数与散射系数的比值。

1.3.1 Kubelka-Munk 单常数理论

对于有色纱线的测色而言,染料以分子的形式存在并且含量很少,所以认为染料的散射对纤维的散射影响很小,可以说散射是由纺织纤维所决定的,故 K/S 值可推导为

$$K/S = (K/S)^1 + \sum_{i=1}^n c_i (K/S)^i \quad (6)$$

式中: $(K/S)^1$ 为本色织物(基材)的 K/S 值; c_i 为第 i 种染料的质量浓度, g/L ; n 为染料的个数。结合式(5)、(6)即为 Kubelka-Munk 单常数理论。

早期很多学者认为色纺属于减法混色,并采用 Kubelka-Munk 单常数理论来预测有色纤维混色,但却得不到满意的匹配结果。虽然 Kubelka-Munk 单常数理论可应用于预测纺织品的染色配方,但并不适合色纺纱有色纤维混色的配色。

1.3.2 Kubelka-Munk 双常数理论

Kubelka-Munk 还有另外一个重要的理论,即有色材料的吸收和散射系数,是由各染料或颜料的吸收和散射系数组合而成的 Kubelka-Munk 双常数理论,公式为

$$K/S = \frac{\sum_i c_i K_i}{\sum_i c_i S_i} \quad (7)$$

式中: K_i 为第 i 个色料的吸收系数; S_i 为第 i 个色料的散射系数; c_i 为第 i 个染料的质量浓度, g/L ; $i = 1, 2, \dots$ 。

需要求解各单色纤维的 K 与 S , 可由几种单色纤维混色得到不同质量比的样品,利用测得样品的 K/S 值代入式(7)列出方程组。为得到更精确的解,可运用最小二乘法求解,即可得到各单色纤维的吸收系数和散射系数。

国外较早就开始了有关有色纤维混纺织物配色的研究,奠定了以 Kubelka-Munk 理论为基础的光传播模型。Burlone^[28] 提出用 Kubelka-Munk 双常数理论解释色纺颜色学特征并非是单纯的加法或减法混色,并将其与 Stearns-Noechel 模型和 Friele 模型比较,表明此公式的预测效果最好。

最早由 Duncan 提出求解有色基质的 K 与 S 方法,1976 年 Cairns 提出色调阶梯法,但是都不能得到准确的答案^[2]。之后, Walowit 等^[29] 在色调阶梯法的基础上采用最小二乘法求解吸收系数 K 和散射系数 S , 得到了较为满意的结果。

Burlone^[30] 研究了纤维透光或折叠程度对预测混色织物的影响,认为不透光或者没有折叠的织物,颜色形成的机制是加权平均或加法混色;对于半透

明或折叠织物,颜色的形成机制符合 Kubelka-Munk 理论且颜色与不透光的混色纤维相似。Amirshahi 等^[31] 将减法混色与加法混色同时作为混色机制,实验表明通过 Kubelka-Munk 理论计算得到的预测值与实际值的色差在可接受范围内,但对于半透明的物质使用 Kubelka-Munk 理论预测时则需要修正。

我国学者对 Kubelka-Munk 模型也进行了不少研究,其中车江宁等^[4] 较早就开始研究有色纤维的混色原理。采用最小二乘法计算得到 K 与 S 值,将其用于 Kubelka-Munk 单常数与双常数的计算,并探讨了纤维的模拟 K/S 值与真实 K/S 值之间的差异。研究表明单常数理论得到的预测色彩与真实色彩之间的色差大,而双常数理论可达到光谱匹配,为今后混色织物配色应用打下了坚实的基础。朱松^[32] 对彩色纤维配色方法进行探究,利用 Kubelka-Munk 理论及其推论分析得到双组分混色纤维在某一波长下的 K/S 值总是介于该波长下 2 种单色纤维的 K/S 值之间,利用一种简易算法 $(K/S)_\lambda = C_A (K/S)_\lambda + C_B (K/S)_\lambda + \dots$ 。其中, C 为单色纤维在混色纤维中所占质量分数,%; $C_A + C_B + \dots = 1$ 。验证得到此公式可应用于双组分混色纤维,但并未对多组分的情况进行验证。许佳艳^[19] 采用 3 种预测模型对涤/棉双组分混色织物进行配色研究,修正了 Stearns-Noechel 模型与 Friele 模型,建立了绝对值法和相对值法计算单色纤维的吸收系数 K 和散射系数 S 的方法及其全光谱配色算法,结果表明采用相对值法在涤/棉混色织物配色上精确度最高。徐春川^[2] 将用于荧光染料织物的 James S. Bonham 公式与双常数 Kubelka-Munk 理论相结合应用在含荧光纤维色纺纱的配色中,虽然没有得到很好的效果,但对含荧光染料的色纺纱配色模型进行了初步的探索,有一定的借鉴意义。Ma 等^[33] 对 Stearns-Noechel 模型、Friele 模型和 Kubelka-Munk 双常数理论进行对比实验,结果表明,无论是在单组分还是双组分混纺纱配色中,3 种模型均可用于色纺纱的配色,但均具有不同的局限性,然而只是针对麻灰色混纺纱,还值得进一步研究。在纺织行业中,色纺纱配色不仅是难题,纬全提花织物的配色问题至今也还未解决。周华等^[34-35] 对 Kubelka-Munk 双常数理论用于纬全提花织物的配色可行性进行了研究,发现此模型适用于纬全提花织物的配色,可做进一步优化减小误差,但是还未研发出配色软件。

虽然 Kubelka-Munk 理论在配色上预测精度高,但也存在一些问题:在实际应用中的情况与上述做出的不透明介质理论的理想假设条件有差异; Kubelka-Munk 双常数理论很复杂,计算比较烦琐。

1.4 神经网络模型

人工神经网络^[36-37]是由众多简单处理单元相互连接而成的复杂网络,类似于大脑神经突触连接结构进行分布式并行信息处理的算法模型。其中应用最广的是 Rumelhard 等提出的 BP 神经网络,是一种 3 层或 3 层以上的多层网络,包括 1 个输入层,1 个或多个隐含层和 1 个输出层。将训练样本提供给 BP 神经网络后,信息从输入层经隐含层向输出层传播,获得网络的输入响应。之后通过反向传播由输出层经由隐含层逐层调整网络的连接权值,最后回到输入层。随着误差逆向传播修正的进行,正确率也在不断的提升。理论上已经证明总存在一个结构为 3 层的前向神经网络能够精确地逼近任意的连续函数 f 。

在应用方面 BP 神经网络研究已取得了一些成果。Boldrin 等^[38]首次提出将神经网络应用于颜色匹配。Mizutani 等^[39]探讨了神经网络用于配色的可行性,并且进行了相关参数的研究。Kandi 等^[40]提出了用遗传算法预测颜色配方的方法。王汇锋等^[41]将人工神经网络运用到毛纺测配色系统中,对颜色进行识别、分类,最终实现配色。赵晨飞^[42]利用 BP 神经网络实现颜色的光谱反射曲线与油墨网点百分比的转换关系,发现在可见光谱范围内分段取 6 个点来表征不同颜色的光谱变化,可大大减小训练量。

在色纺纱的配色领域, BP 神经网络应用于色纺纱的配色是目前研究的趋势。李君丽^[43]提出将 BP 神经网络应用在麻灰纱的反射率值与色纤维质量比例关系分析上,并指出虽然 BP 神经网络功能强大,但存在运行时间长的弊端。将 BP 神经网络与遗传算法相结合是一种解决途径,结果表明,这种改进模型在运算速度上有很大提高,训练精度也有一定程度的提升。但该研究只针对麻灰纱,且也未完成软件的编写,缺乏完整配色系统的构建。马崇启等^[44]同样将遗传算法引入 BP 神经网络中,对红、黄、蓝 3 种原液着色的粘胶纤维进行实验。研究表明,当样本包含在训练样本中时,绝对误差的均值为 0,具有非常优异的配色性能,但当样本不在训练样本中时配色精度稍差,提出的解决途径是增加训练样本数以减少误差,也可对如何提高这种方法的泛化性做进一步的研究。程璐等^[45]对 BP 神经网络、Datacolor MATCH 系统模拟染料配色方法和 Kubelka-Munk 双常数理论进行麻灰纱配色的对比实验,结果表明,均可用于配色且误差相差不大,对于 3 种黑白纤维混合配色的情况, BP 神经网络的方法实用性与精度最高,但是此结论只适用于麻灰纱,

还需做进一步的研究。Furferi 等^[46]将神经网络与其他的几种配色模型进行对比,结果表明神经网络配色模型的平均预测色差最小,但并没有提及泛化性能,所以也不能说明神经网络具有使用价值,因此,沈加加等^[37]研究了神经网络是否对色纺纱配色具有可行性,并分析了各改进算法,从中选定了预测精度高、迭代时间少、速度快的 Levenberg-Marquardt 算法进行模型训练,得出如下结论: BP 神经网络模型可实现色纺纱反射率与配方之间的非线性映射;新型算法在训练时间和迭代次数上有较大的优势;隐含层节点数对仿真结果影响较小;平均预测色差很小,但超出训练部分的样本,预测色差则较大;下一步研究的关键在于提高神经网络的泛化能力。

Shen 等^[47]针对泛化性能做了进一步研究,将 Stearns-Noechel 模型与神经网络模型结合形成 (S-N)-ANN 模型,试图改善 BP 神经网络的泛化性能。结果表明,在相同数量的训练样本情况下,与 BP 神经网络相比,该模型在更短的时间却能达到更好的相关性,且得到的平均误差比 Stearns-Noechel 模型或 BP 神经网络模型更低,充分发挥了 2 个模型的优点,是一种更为准确的混色纤维配色的预测方法。

BP 神经网络算法具有较高的预测精度、优异的非线性映射能力、泛化能力以及很好的容错能力,但也存在一些内在的缺陷,主要表现在以下几方面:易陷入局部极小值,得不到全局最优值;学习新样本时,会有遗忘旧样本的趋势;训练次数多,学习效率低从而收敛速度慢;隐节点的选取缺乏理论指导。

针对以上问题,国内外研究学者已提出一些有效的改进办法,其中 3 种较常用的方法是:增加动量项、自适应调节学习率和引入陡度因子。目前已经有不少学者将 BP 神经网络应用到色纺纱的配色中,但还未得到可靠的配色系统。而运用 BP 神经网络改进算法的文献还鲜有报道,所以可以将其作为下一步研究的方向。

2 计算机配色算法

计算机配色算法有 3 种:三刺激值匹配、光谱匹配和色号归档检索。其中色号归档检索仍然是对人工经验配色结果的检索,而前 2 种方法都是以 Kubelka-Munk 光学函数为理论依据^[4]。

色纺纱的计算机配色流程是:在运用计算机理论模型求出相关未知数后,代入计算机配色算法中,即可计算出色差大小。当色差在接受范围内时,则

停止计算,即可得到混色纤维配色比例;当色差大于允许范围,则进行逼近循环计算,直到色差在允许范围内,否则计算失败。

2.1 三刺激值匹配

三刺激值匹配^[48,34]的原理是试样与标样的三刺激值相等。其照明体、观察者和仪器需要相同,若其中 1 个条件变化,则会破坏等色,故又称为条件匹配。三刺激值匹配最早是由 Park 和 Sterns 提出的,虽然有很多学者研究发展了这种算法,但以 Allen 的矩阵算法便于编制计算机程序而运用广泛^[49]。其基本数学表达式为

$$(\Delta x \ \Delta y \ \Delta z) \longrightarrow (0 \ 0 \ 0) \quad (8)$$

式中, Δx 、 Δy 、 Δz 分别表示标样与试样的三刺激值的差值。

其矩阵表达式为

$$C = (TED\Phi)^{-1}TEDF_s \quad (9)$$

式中: C 表示不同颜色的单色纤维比例,是一个 3×1 的列矩阵; T 表示标准观察者光谱三刺激值矩阵; E 表示 CIE 标准光源的相对光谱能量分布矩阵; D 表示标准色各波长 $d_\lambda = dR/d\lambda(R)$ 值置于对角线,其余元素设为 0 的矩阵; Φ 表示单色纤维的 $f(R_{i,\lambda})$ 值矩阵; F_s 表示标样的 $f(R_{s,\lambda})$ 值矩阵。即:

$$\Phi = \begin{bmatrix} f(R_{1,400}) & f(R_{2,400}) & f(R_{3,400}) \\ f(R_{1,410}) & f(R_{2,410}) & f(R_{3,410}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ f(R_{1,700}) & f(R_{2,700}) & f(R_{3,700}) \end{bmatrix}_{30 \times 3}$$

$$D = \begin{bmatrix} d_{400} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & d_{410} & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & d_{700} \end{bmatrix}_{31 \times 31}$$

$$F_s = \begin{bmatrix} f(R_{s,400}) \\ f(R_{s,410}) \\ \vdots \\ f(R_{s,700}) \end{bmatrix}$$

2.2 光谱匹配

光谱匹配的原理是在各个波长下,试样与标准样的反射率相等。由于反射光谱能反映出织物的颜色,所以也称为最完美的配色。而且光谱的异谱性很低,因此,对任何光源,观察者都能匹配,也称为无条件匹配^[48,34]。其数学表达式为

$$f(R_{m,\lambda}) = f(R_{s,\lambda}) \quad (10)$$

式中: $R_{m,\lambda}$ 为试样反射率,%; $R_{s,\lambda}$ 为标样反射率,%。式(10)表示试样的反射率函数与标样反射率函数相等。

矩阵表达式为

$$C = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T F_s \quad (11)$$

这 2 种匹配算法具有不同的优缺点^[2,19,50]:三刺激值法在固定光源照明的条件下,可求出色差为 0 的配方。但其只能求解 3 种单色纤维比例,即使结合最小二乘法也只能用于 2 种、3 种或 4 种单色纤维混色的情况,并且会产生同色异谱的现象。光谱匹配法最大的优点是可以得到多个混色比例,例如取 400~700 nm 波段,若波长间隔 10 nm 计算,就可罗列出 31 个方程,因此,利用这种配色方法最多可以求出 31 个单色混色的情况。对任何光源,观察者都能达到颜色匹配,而且它可以解决异谱配色的困难。但达到光谱配色很困难,计算复杂并且经济性较差,所以三刺激值算法配色应用更普遍。

李戎等^[20]在 Stearns-Noechel 模型的基础上,采用这 2 种匹配算法对 18 种混色粘胶纤维处方进行匹配。结果发现 2 种算法均可以应用,但是三刺激值算法的色差更小。

王喜昌等^[51]建立了三波段配色法,把可见光光谱均分成 3 个波段,然后在每个波段上运用三刺激值法配色,并采用最小二乘法对波段上的色差进行优化,最终可以确定出配方。这种方法最多可求解 9 个单色混色的情况。这是在三刺激值方法和全光谱方法的基础上建立的一种配色法,与三刺激值法相比,色差虽然差别不大,但是可以解决多种染料配方;与全光谱匹配法相比,配色色差比较小。

3 结束语

目前,现有的配色模型都有各自的缺陷,以本文介绍的光学模型为例,Stearns-Noechel 模型和 Friele 都需要求证 1 个或多个未知参数,并且 Friele 模型计算精度不高,而 Kubelka-Munk 理论计算较为烦琐,都不太适用于色纺纱的配色。近几年新兴的 BP 神经网络模型的计算精度高,但是需要获取大量的训练样本来加强泛化能力。今后色纺纱配色的研究趋势主要有:

1) 在传统配色模型的基础上进行改进,提高其配色精度。

2) 根据企业自身的产品特征进行大量实验计算,得到适合本企业的参数值。色纺纱混色的光学原理复杂,既不是单纯的加法混色,也不是单纯的减法混色,因此,配色中的影响因素较多。而一般企业生产具有自己的特性,产品在材质、规格上变化不大,所以可根据企业自身的产品特征,在目前色纺纱研究成果的基础上再进行实验,得到适合本企业

的参数值。这种针对不同的企业设计不同参数的配色软件也是将来可以探索的方向之一。

3) 改进求解配色模型中未知参数的方法,利用创新的方法简化传统求解未知参数的复杂过程,以增强传统配色模型的使用效率与实用性。

4) 寻求新型的配色模型或将不同的模型进行有机结合,取长补短。近年来,BP 神经网络研究较多,还有如遗传算法、插值法等,也逐渐进入色纺纱的配色领域。

5) 可以尝试对部分国内色纺企业常用的纤维品种(特别是个别常用原液着色纤维品种)进行标准化,从而简化配色中的复杂计算问题。目前各个企业的生产材料、颜色标准不一,增加了配色系统普及和运用的难度。

FZXB

参考文献:

- [1] 沈加加,张志强,陈燕兵,等. 基于 Stearns-Noechel 模型的混色毛条颜色预测[J]. 纺织学报,2008,29(11):61-66.
SHEN Jiajia,ZHANG Zhiqiang,CHEN Yanbing,et al. Match prediction for blended-color wool tops based on Stearns-Noechel model[J]. Journal of Textile Research,2008,29(11):61-66.
- [2] 徐春川. 含荧光染料色纺纱的测配色[D]. 上海:东华大学,2014:2.
XU Chunchuan. Color measuring and matching of colored fiber blends containing fluorescent dyes[D]. Shanghai: Donghua University,2014:2.
- [3] 曹应刚. 色纺纱计算机配色系统的应用性能及夹花评价[D]. 杭州:浙江理工大学,2012:1-10.
CAO Yinggang. The application of computer color matching system for melange yarn and the evaluation of non-homogeneous effect[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-tech University,2012:1-10.
- [4] 车江宁,陈东辉. 天然色棉织物测配色[J]. 纺织学报,2000,21(3):62-64.
CHE Jiangning,CHEN Donghui. Color measuring and matching of natural colored cotton textile[J]. Journal of Textile Research,2000,21(3):62-64.
- [5] 沈加加,胡英杰,刘伟,等. 基于 Friele 模型的色纺纱光谱配色研究[J]. 针织工业,2013(5):32-36.
SHEN Jiajia,HU Yingjie,LIU Wei,et al. Study of spun-dyed yarns spectral color matching based on Friele model[J]. Knitting Industries,2013(5):32-36.
- [6] DUNTLEY S Q. The prediction and control of colored fiber blends by optical means[J]. Am Dyest Rep,1941,30:698-700.
- [7] 陈维国,周华,温泉,等. 羊毛混色纺纱计算机智能测色配料系统[J]. 毛纺科技,2010,38(4):48-52.
CHEN Weiguo,ZHOU Hua,WEN Quan,et al. Intelligent color matching system of wool blending yarn[J]. Wool
- Textile Journal,2010,38(4):48-52.
- [8] STEARNS E I, NOECHEL F. Spectrophotometric prediction of color of wool blends[J]. American Dyestuff Reporter,1944,33(9):177-180.
- [9] PHILIPS-INVERNIZZI B, DUPONT D, JOLLY-DESODT AM, et al. Color formulation by fiber blending using the Stearns-Noechel model[J]. Color Research & Application,2002,27(2):100-107.
- [10] ASPLAND J R, ZHOU M. Influence of blending on color appearance of black and white fiber blends[J]. Textile Chemist & Colorist & American Dyestuff Reports,2000,32(10):47-51.
- [11] 李戎,宋阳,顾峰. 基于 Stearns-Noechel 模型的纤维光谱配色算法[J]. 纺织学报,2007,28(1):77-80.
LI Rong,SONG Yang,GU Feng. Spectrophotometric algorithm of pre-colored fiber based on Stearns-Noechel model[J]. Journal of Textile Research,2007,28(1):77-80.
- [12] 王泉,姚佳,李艳清,等. Stearns-Noechel 模型在天然彩色棉混色中的应用[J]. 纺织学报,2016,37(1):93-97.
WANG Quan,YAO Jia,LI Yanqing,et al. Application of Stearns-Noechel model on color blending of naturally colored cotton[J]. Journal of Textile Research,2016,37(1):93-97.
- [13] 沈加加,程凤侠,陈维国,等. Stearns-Noechel 模型优化及毛条混色配色系统开发[J]. 纺织学报,2009,30(3):121-125.
SHEN Jiajia,CHENG Fengxia,CHEN Weiguo,et al. Development of color matching system for pre-colored wool top blends by optimized Stearns-Noechel model[J]. Journal of Textile Research,2009,30(3):121-125.
- [14] 沈加加,陈维国,刘伟. 基于约束最小二乘法的色纺纱配色方法[J]. 针织工业,2015(6):31-33.
SHEN Jiajia,CHEN Weiguo,LIU Wei. Color matching method of colored spun yarn based on constrained least square method[J]. Knitting Industries,2015(6):31-33.
- [15] LI Q, ZHANG F, JIN X, et al. Optimized Stearns-Noechel model to predict mixed color values of yarn-dyed fabrics[J]. Fiber,2014,70(9):218-224.
- [16] 王玉娟,马崇启,刘建勇,等. 应用改进 Stearns-Noechel 模型的色纺纱配色技术[J]. 纺织学报,2017,38(10):25-31.
WANG Yujuan,MA Chongqi,LIU Jianyong,et al. Matching color technology of color blended yarn based on modified Stearns-Noechel model[J]. Journal of Textile Research,2017,38(10):25-31.
- [17] BURLONE D A. Theoretical and practical aspects of selected fiber-blend color-formulation functions[J]. Color Research & Application,1984,9(4):213-219.
- [18] DAVIDSON H R, TAYLOR M. Prediction of the color of

- fiber blends [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1965, 55(1): 96–100.
- [19] 许佳艳. 涤棉双组分纤维混色计算机辅助配色的研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2013: 16–30.
XU Jiayan. The study on computer aid matching for colored fiber blends of polyester and cotton [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2013: 16–30.
- [20] 李戎, 宋阳, 黄劲旭, 等. 有色纤维的配色方法研究[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 21(4): 83–87.
LI Rong, SONG Yang, HUANG Jinxu, et al. Study on color matching method of coloured fiber [J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2006, 21(4): 83–87.
- [21] ASPLOD J R, ZHOU M. Influence of blending on color appearance of black and white fiber blends [J]. *Textile Chemist & Colorist & American Dyestuff Reporter*, 2000, 32(10): 47–51.
- [22] FRIELE L F C. The application of colour measurement in relation to fiber blending [J]. *Journal of the Textile Institute Proceedings*, 1952, 43(8): 604–611.
- [23] BARBARA Thompson, HAMMERSLEY M J. Prediction of the colour of scoured-wool blends [J]. *Journal of the Textile Institute Proceedings & Abstracts*, 1978, 69(1): 1–7.
- [24] PHILIPS-INVERNIZZI B, DUPONT D, CAZE C. Formulation of colored fiber blends from Friele's theoretical model [J]. *Color Research & Application*, 2010, 27(3): 191–198.
- [25] MILLER M A, MOIR M J, GUTHRIE J C, et al. A computed colour catalogue of fibre blends and its use in match prediction [J]. *Coloration Technology*, 2010, 79(12): 604–612.
- [26] 马崇启, 程璐, 王玉娟, 等. 基于 Friele 模型的彩色纤维混色配方模型 [J]. *纺织学报*, 2017, 38(12): 33–37.
MA Chongqi, CHENG Lu, WANG Yujuan, et al. Color fiber mixing formula algorithm based on Friele model [J]. *Journal of Textile Research*, 2017, 38(12): 33–37.
- [27] 张晓云. 活性染料三原色泡沫染色拼色和配色研究[D]. 上海: 东华大学, 2016: 8.
ZHANG Xiaoyun. The color matching system and combination dyeing of trichromatic reactive dyes in foam dyeing [D]. Shanghai: Donghua University, 2016: 8.
- [28] BURLONE D A. Formulation of blends of precolored nylon fiber [J]. *Color Research & Application*, 1983, 8(2): 114–120.
- [29] WALOWIT E, MCCARTHY C J, BERNS R S. An algorithm for the optimization of Kubelka-Munk absorption and scattering coefficients [J]. *Color Research & Application*, 1987, 12(6): 340–343.
- [30] BURLONE D A. Effect of fiber translucency on the color of blends of precolored fibers [J]. *Textile Research Journal*, 1990, 60(3): 162–167.
- [31] AMIRSHAHI S H, PAILTHORPE M T. Applying the Kubelka-Munk equation to explain the color of blends prepared from precolored fibers [J]. *Textile Research Journal*, 1994, 64(6): 357–364.
- [32] 朱松. 彩色纤维配色方法研究初探 [J]. *聚酯工业*, 2010, 23(1): 29–32.
ZHU Song. Preliminary study on color fiber matching method [J]. *Polyester Industry*, 2010, 23(1): 29–32.
- [33] MA C, WANG Y, LI J, et al. Theoretical and practical analysis of fiber blend model in gray spun yarn [J]. *Journal of Engineered Fibers & Fabrics*, 2017, 12(2): 28–38.
- [34] 王春燕. 纬全显色提花织物的混色模型研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2012: 60–61.
WANG Chunyan. Research on the color-match model of pre-colored weft-all-coloring jacquard fabric [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2012: 60–61.
- [35] ZHOU H, WANG C Y, ZHOU J. Color prediction for weft-all-coloring jacquard fabric based on the two-constant Kubelka-Munk theory [J]. *Advanced Materials Research*, 2012(418–420): 2278–2281.
- [36] 曹乐, 李润, 袁艳, 等. 基于 BP 神经网络的气调包装评价方法研究 [J]. *包装工程*, 2014(1): 38–41.
CAO Le, LI Run, YUAN Yan, et al. Study on the method of MAP evaluation based on BP network [J]. *Packaging Engineering*, 2014(1): 38–41.
- [37] 沈加加, 周翔, 屠天民. 基于 BP 神经网络的色纺纱配色 [J]. *纺织学报*, 2015, 36(11): 34–38.
SHEN Jiajia, ZHOU Xiang, TU Tianmin. Recipe prediction of melange yarn based on BP neural network [J]. *Journal of Textile Research*, 2015, 36(11): 34–38.
- [38] BOLDRIN E, SCETTINI R. Cross-media color matching using neural networks [J]. *Pattern Recognition*, 1999, 32(3): 465–476.
- [39] MIZUTANI E, JANG J S R, NISHIO K, et al. Coactive neuro-fuzzy modelling for colour recipe prediction [C] // IEEE International Conference on Neural Networks. Perth: IEEE, 1995: 2252–2257.
- [40] KANDI S G, TEHRAN M A. Color recipe prediction by genetic algorithm [J]. *Dyes & Pigments*, 2007, 74(3): 677–683.
- [41] 王汇锋, 谢春萍, 卞克玉. 基于人工神经网络的颜色识别方法在毛纺测配色系统中的应用 [J]. *毛纺科技*, 2006, 34(1): 14–16.
WANG Huifeng, XIE Chunping, BIAN Keyu. Application of color recognition method based on artificial neural network in wool color matching system [J]. *Wool Textile Journal*, 2006, 34(1): 14–16.
- [42] 赵晨飞. 纸张性能对印刷色彩控制的影响 [D]. 西安: 陕西科技大学, 2014: 101–103.

- ZHAO Chenfei. The influence on color control in printing of paper's property [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology 2014: 101 - 103.
- [43] 李君丽. 麻灰纱色纤维混合模型分析 [D]. 天津: 天津工业大学, 2016: 43 - 44.
- LI Junli. Analysis of colored fiber mixture model of hempash yarn [D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University 2016: 43 - 44.
- [44] 马崇启, 王玉娟, 刘建勇, 等. 基于 Ga-BP 神经网络的颜色纺纱配色 [J]. 天津工业大学学报, 2016, 35(6): 27 - 31.
- MA Chongqi, WANG Yujuan, LIU Jianyong, et al. Colormatching in colored spun yarn based on Ga-BP neural network [J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2016, 35(6): 27 - 31.
- [45] 程璐, 马崇启, 王玉娟, 等. 麻灰纱中色纤维混合模型运用 [J]. 纺织学报, 2017, 38(7): 44 - 48.
- CHENG Lu, MA Chongqi, WANG Yujuan, et al. Application of colored fiber mixed models in gray spun yarn [J]. Journal of Textile Research, 2017, 38(7): 44 - 48.
- [46] FURFERI R, GOVERNI L. Prediction of the spectrophotometric response of a carded fiber composed by different kinds of coloured raw materials: an artificial neural network-based approach [J]. Color Research & Application, 2011, 36(3): 179 - 191.
- [47] SHEN J, ZHOU X, MA H, et al. Spectrophotometric prediction of pre-colored fiber blends with a hybrid model based on artificial neural network and Stearns-Noechel model [J]. Textile Research Journal, 2016, 87(3): 1 - 9.
- [48] 车江宁. 有色纤维测配色的研究 [D]. 上海: 东华大学, 2002: 55.
- CHE Jiangning. Color measuring and matching of colored fiber blends [D]. Shanghai: Donghua University 2002: 55.
- [49] ALLEN E. Basic equations used in computer color matching [J]. Journal of the Optical Society of America, 1966, 56(9): 1256 - 1257.
- [50] 许法强. 基于光谱的多色复制技术研究及实现 [D]. 武汉: 武汉大学, 2013: 35 - 37.
- XU Faqiang. Research on spectral-based multiple-ink reproduction and its implementation [D]. Wuhan: Wuhan University 2013: 35 - 37.
- [51] 王喜昌, 周丰昆, 陈淑芳, 等. 三波段法计算机配色的研究 [J]. 印染, 1998, 24(8): 11 - 14.
- WANG Xichang, ZHOU Fengkun, CHEN Shufang, et al. Study on tri-waveband computer colour matching method [J]. China Dyeing & Finishing, 1998, 24(8): 11 - 14.

欢迎订阅 2019 年《产业用纺织品》

《产业用纺织品》(月刊), 大 16 开, 全彩色印刷, 定价 12.00 元/册, 全年 144.00 元, 中国标准连续出版物号: $\frac{\text{ISSN } 1004 - 7093}{\text{CN } 31 - 1595 / \text{TS}}$ 邮发代号: 4 - 492。

《产业用纺织品》由东华大学主办, 为中文核心期刊, 已入编中国学术期刊(网络版)、万方数据 - 数字化期刊群、中文科技期刊数据库、超星期刊域出版平台及博刊网等。

《产业用纺织品》主要刊登有关国内外各种产业用纺织品和非织造布的综述、科研、生产技术的报告、国内外新产品、新材料、新技术、新设备的报道, 有关专利、标准和测试方法的介绍, 国内外有关的动态、市场信息和新闻简讯。《产业用纺织品》努力成为纺织、冶金、化工、电子、医疗卫生、农林、水利、建材及国防工业各科研、生产和使用单位之间信息联络的纽带, 促进中国产业用纺织品和非织造材料的研究、生产和应用。

《产业用纺织品》承接相关广告, 并热诚为客户宣传, 欢迎有意者来电或发 E-mail 联系。

地址: 上海延安西路 1882 号第三教学楼 15 楼

电话: 021 - 62373227 62378228

传真: 021 - 62373898

E-mail: techtex@dhu.edu.cn

